

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I TECHNOLOGICZNE WYSOKOWYTRZYMAŁYCH NANOSTRUKTURALNYCH STALI BAINITYCZNYCH

W artykule omówiono zagadnienie optymalizacji parametrów technologicznych wytwarzania stali nanostrukturalnej umożliwiających skrócenie czasu wygrzewania izotermicznego oraz uzyskanie wysokiej wytrzymałości i plastyczności. W wyniku dwuetapowej obróbki izotermicznej uzyskano korzystną kombinację wytrzymałości i ciągliwości. Przeprowadzono badania spawalności oraz odporności na ścieranie stali nanostrukturalnych. Materiał spawany w stanie zmiękczonej, a następnie poddany finalnej obróbce cieplnej, charakteryzował się wysoką jakością złącza (brak pęknięć i mikropeęknięć) oraz równomierną twardością ok. 600 HV. Stale nanostrukturalne cechuje wyższa odporność na ścieranie od komercyjnej stali trudnościeralnej klasy 600.

Słowa kluczowe: stal nanostrukturalna bainityczna, obróbka izotermiczna, spawalność, odporność na ścieranie

SELECTED MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH NANOSTRUCTURED BAINITIC STEELS

Problem of optimization of production technology parameters of nanostructured bainite steel to shortening of time of isothermal heat treatment and improve strength and toughness were discussed. As a result of two stage of isothermal heat treatment advantageous combination of strength and toughness were achieved. Examination of weldability and wear resistant of the steel were carried out. The material welded in the soft annealing state and next putted to the final heat treatment was characterize by high quality of the joint (without cracks and microcracks) and uniform hardness about 600 HV. Nanostructured bainite steels were characterize of higher wear resistant in comparison with commercial wear resistant steel grade 600.

Keywords: nanostructured bainite steel, isothermal heat treatment, weldability, wear resistance

1. WPROWADZENIE

Stal nanostrukturalna bainityczna jest nowym materiałem przeznaczonym m.in. do zastosowania w postaci blach stanowiących elementy systemów ochrony przed ostrzałem lub odpornych na ścieranie. Dotychczas wykonane badania blach z tej stali, w tym testy ostrzałem oraz badania blach perforowanych, potwierdziły wysoką zdolność tego materiału do pochłaniania i rozpraszania energii udarowej bez powstawania pęknięć. Stosowane parametry finalnej obróbki cieplnej stali NANOS-BA[®] polegającej na wygrzewaniu izotermicznym, charakteryzują długie czasy od kilkudziesięciu do ponad stu godzin. Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej stali nanostrukturalnych to wciąż aktualne zagadnienie badawcze podejmowane w celu poprawy właściwości użytkowych tej grupy gatunkowej stali oraz w celu obniżenia kosztów wytwarzania [1–11]. W roku 2016 w IMŻ zrealizowano badania blach perforowanych oraz wytrzymałości na ścinanie stali nanostrukturalnej [12, 13]. Badania te wykonano dla ograniczonej liczby wariantów obróbki cieplnej. Od kilku lat trwają także badania dotyczące mechanizmów odkształcenia dynamicznego stali nanostrukturalnych [14, 15].

Odporność na zużycie ścierne i erozyjne stali nanostrukturalnej była przedmiotem projektów realizowanych w IMŻ w latach 2014–2016. Były to prace wstępne obejmujące m.in. opracowanie metodyki badań, w tym przygotowania próbek i analizy wyników. Porównawcze badania ścieralności z komercyjnymi gatunkami stali trudnościeralnych wykonane we współpracy z Politechniką Śląską w Katowicach, wskazały kierunek optymalizacji parametrów wytwarzania w celu poprawy odporności na ścieranie [16, 17]. W niniejszej pracy wykonano badania ścieralności stali nanostrukturalnej we współpracy z Instytutem Metali Nieżelaznych.

W artykule przedstawiono wyniki badań zrealizowane w celu optymalizacji parametrów obróbki cieplnej dla skrócenia czasu wygrzewania izotermicznego i dostosowania sposobu oraz parametrów obróbki do wytwarzania blach pancernych i odpornych na ścieranie. Wykonano próbne złącza blach ze stali nanostrukturalnej bainitycznej metodą TIG oraz przeprowadzono badania materiałowe i pomiary twardości tych złączy. Celem badań było wytypowanie metody spajania stali nanostrukturalnych i ocena zdolności spoiny do przeniesienia obciążeń, w tym udarowych. W zakresie badań dotyczących ścieralności ustalono optymalne warianty obróbki cieplnej stali nanostrukturalnych gwarantują-

ce jednocześnie wysoką odporność na zużycie ściernie oraz wysoki poziom innych właściwości, w szczególności ciągliwości.

2. MATERIAŁ, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Materiał badań stanowiła stal nanostrukturalna bainityczna NANOS-BA® w postaci blach walcowanych na gorąco o grubości w zakresie 4÷8 mm. Skład chemiczny materiału badań przedstawiono w tabeli 1.

Zrealizowano testy wygrzewania izotermicznego dwuetapowego, tzn. ze zmienną temperaturą procesu. Zmiany temperatury od niższej do wyższej dokonywano w trakcie wygrzewania, uwzględniając techniczne możliwości realizacji tego typu zabiegu w przemysłowych piecach o określonej bezwładności. Dla próbek wytrzymałościowych płaskich o grubości 5÷6 mm i stosowanych pieców laboratoryjnych czas nagrzewania (zmiany temperatury wygrzewania) wynosił poniżej 30 sekund. Badania w celu opracowania optymalnych parametrów obróbki cieplnej blach ze stali nanostrukturalnej obejmowały charakterystykę mikrostruktury, wyznaczenie właściwości mechanicznych i wytrzymałości na ścinanie oraz pomiary twardości. Badania mikrostruktury przeprowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego i skaningowego mikroskopu elektronowego, pomiary właściwości wykonano w statycznej próbie rozciągania, wytrzymałość na ścinanie wyznaczono za pomocą symulatora Gleeble, a pomiary twardości wykonano metodami HV i HRC.

Zakres badań spoin wykonanych metodą TIG obejmował ocenę jakości złącz, analizę makro- i mikrostruktury oraz pomiary twardości. Testowe spoiny wykonano w Instytucie Spawalnictwa. Pomiary twardości obejmowały w szczególności wykonanie rozkładu twardości w obszarze spoiny i w strefie wpływu ciepła.

Zakres eksperymentów i badań w zakresie oceny odporności na ścieranie stali nanostrukturalnych obejmował w pierwszej fazie wytypowanie wariantów i przygotowanie próbek a następnie testy ścierania i szczegółowe pomiary geometrii śladów wytarcia. Do badań jako materiał odniesienia przygotowano próbki ze stali komercyjnych trudnościeralnych. Badania ścieralności wykonano w ramach współpracy z Instytutem Metali Nieżelaznych.

2. WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych wykonanych w statycznej próbie rozciągania przedstawiono w tabeli 2. W ocenie właściwości materiału, poza $R_{p0,2}$, R_m i A analizowano różnicę $A - A_{gt}$, która określa zdolność materiału do odkształcenia plastycznego po

przekroczeniu siły maksymalnej w próbie rozciągania jednoosiowego. Zbliżony do wariantu odniesienia zestaw właściwości uzyskano dla kilku wariantów, dla których zastosowano wygrzewanie dwuetapowe (w dwóch temperaturach). Stosując dwie temperatury wygrzewania izotermicznego i krótszy sumaryczny czas obróbki cieplnej, uzyskano wyższy poziom granicy plastyczności i wydłużenia przy nieznacznym spadku wytrzymałości. Dla wybranych wariantów uzyskano jednocześnie $R_{p0,2}$ w zakresie 1350÷1400 MPa, R_m powyżej 2000 MPa oraz wydłużenie całkowite 14%.

Na rys. 1 zamieszczono przykładowe obrazy mikrostruktury stali nanostrukturalnej bainitycznej po dwuetapowym wygrzewaniu izotermicznym. W przypadku temperatury pierwszego etapu wygrzewania niższej od temperatury początku przemiany martenzytycznej (M_s), poza bainitem nanolistwowym i austenitem reszkowym w stali występował martenzyt listwowy odpuszczony, równomiernie rozłożony w objętości materiału (Rys. 1a). Listwy martenzytu charakteryzowały się szerokością kilku mm, a długość osiągała kilkanaście mm. Ułamek objętości martenzytu zależy głównie od temperatury izotermicznego wygrzewania, a w mniejszym stopniu od czasu pierwszego etapu izotermicznego wygrzewania. Jeśli temperatura obydwu etapów wygrzewania izotermicznego była wyższa od M_s , mikrostrukturę stali stanowił typowy bainit nanolistwowy oraz austenit reszkowy (Rys. 1b).

Wytrzymałość na ścinanie wyznaczono za pomocą symulatora Gleeble 3800 na próbkach płaskich o grubości 3 mm. Stosowano układ badawczy typu stempel-matryca o średnicy stempla 5,8 mm i średnicy otworu matrycy 6,0 mm oraz prędkości stempla w zakresie od ok. 20 do 200 mm/s. Wyznaczono maksymalną siłę ścinania i przemieszczenie do wystąpienia gwałtownego spadku tej siły. Na rys. 2a zamieszczono przykładowe krzywe ścinania dla zakresu prędkości stempla 22÷27 mm/s. Najwyższą wytrzymałością na ścinanie wynoszącą ok. 1500 MPa i jednocześnie największym przemieszczeniem do wystąpienia spadku siły charakteryzowała się stal nanostrukturalna bainityczna (próbka nr 5). Pozostałe próbki stali nanostrukturalnej po wygrzewaniu izotermicznym dwuetapowym wykazywały wytrzymałość na ścinanie w zakresie 1330÷1430 MPa. Na rys. 2b zamieszczono krzywe ścinania dla wyższego zakresu prędkości stempla 154÷184 mm/s. Stal nanostrukturalna – próbka nr 5 – charakteryzuje się najwyższą wytrzymałością na ścinanie ok. 1590 MPa przy przemieszczeniu ok. 0,7 mm. Wytrzymałość ma ścinanie pozostałych wariantów stali nanostrukturalnej po wygrzewaniu dwuetapowym mieści się w zakresie 1415÷1500 MPa przy przemieszczeniu ok. 0,6. Wytrzymałość na ścinanie stali odniesienia – pancerniej martenzytycznej klasy 600 wynosi ok. 1410 MPa przy przemieszczeniu ok. 0,5 mm.

Tabela 1. Skład chemiczny blach ze stali nanostrukturalnej bainitycznej, % mas., oraz temperatura M_s , °C i równoważnik węgla CE, %

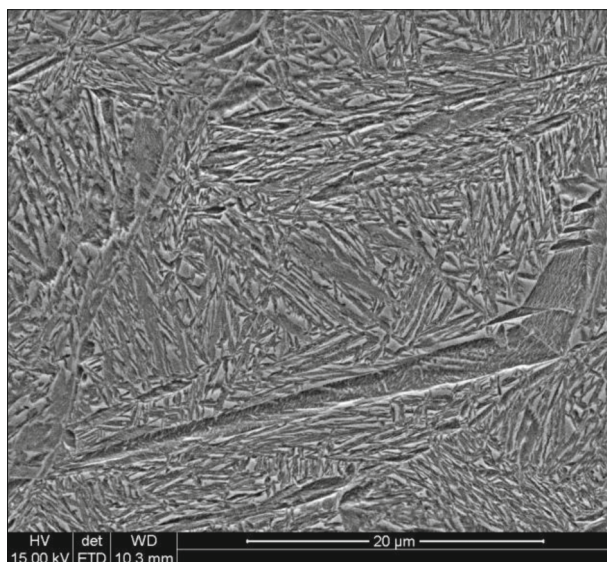
Table 1. Chemical composition of sheets made of nanostructured bainite steel, weight %, and M_s temperature, °C, and carbon equivalent (C.E.), %

C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Mo	Ti	Alc	Cu	M_s	CE
% mas.											°C	%
0,58	1,90	1,82	0,012	0,005	1,32	0,095	0,72	0,010	0,019	0,11	201	1,34

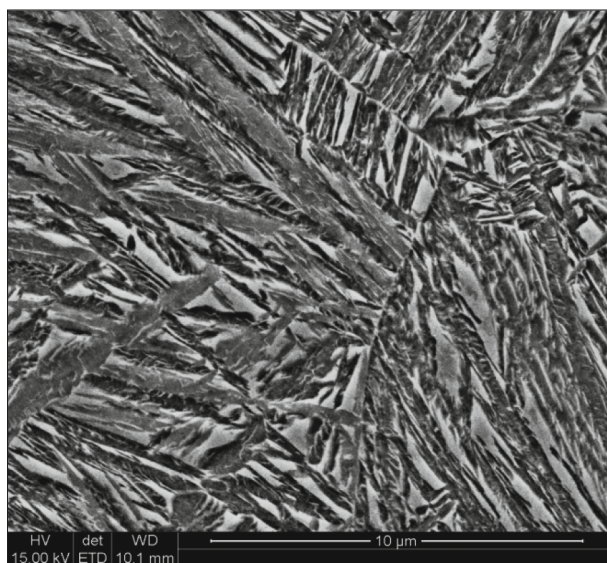
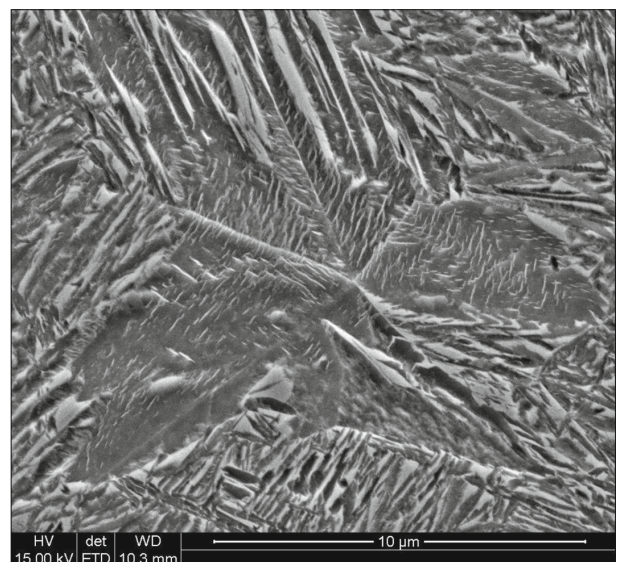
$$M_s = 540 - 425C - 30Mn - 12Cr - 7,5Mo \text{ [}^\circ\text{C]} \quad CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \text{ [%]}$$

Tabela 2. Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych wyznaczonych w statycznej próbie rozciągania
 Table 2. Examination results for mechanical properties determined in a tensile static test

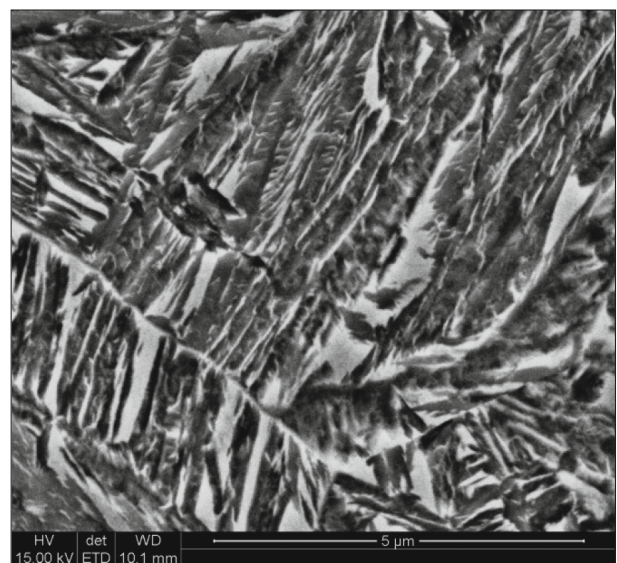
Oznaczenie (nr) próbki	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A %	A_{gt} %	$R_m/R_{p0,2}$	$A - A_{gt}$ %	Sumaryczny czas wygrzewania godz.
21	1373	2028	12,2	9,9	1,48	2,3	74 godz 5 min.
11	1249	2039	14,7	10,5	1,63	4,2	72
22	1315	1957	16,2	14,7	1,49	1,5	96
19	1277	2062	13,3	11,5	1,61	1,8	64
17	1314	2090	12,2	11,5	1,59	0,7	72
12	1314	1917	14,9	11,6	1,46	3,3	64
13	1234	1906	15,5	11,6	1,54	3,9	72
8	1281	1847	17,5	14,5	1,44	3,0	96
6	1364	2089	14,7	11,5	1,53	3,2	96
5	1452	1999	13,3	11,4	1,38	1,9	120
7	1415	2019	14,2	11,7	1,43	2,5	91
1	1404	1964	15,3	11,1	1,40	4,2	96
0	1327	2142	12,2	11,2	1,61	1,0	120 wariant odniesienia



a)

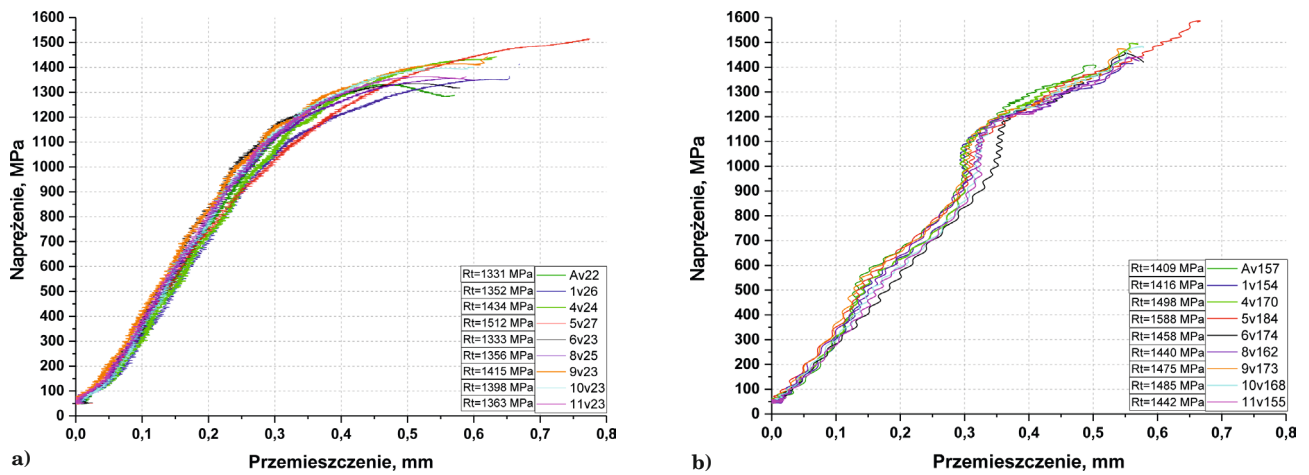


b)



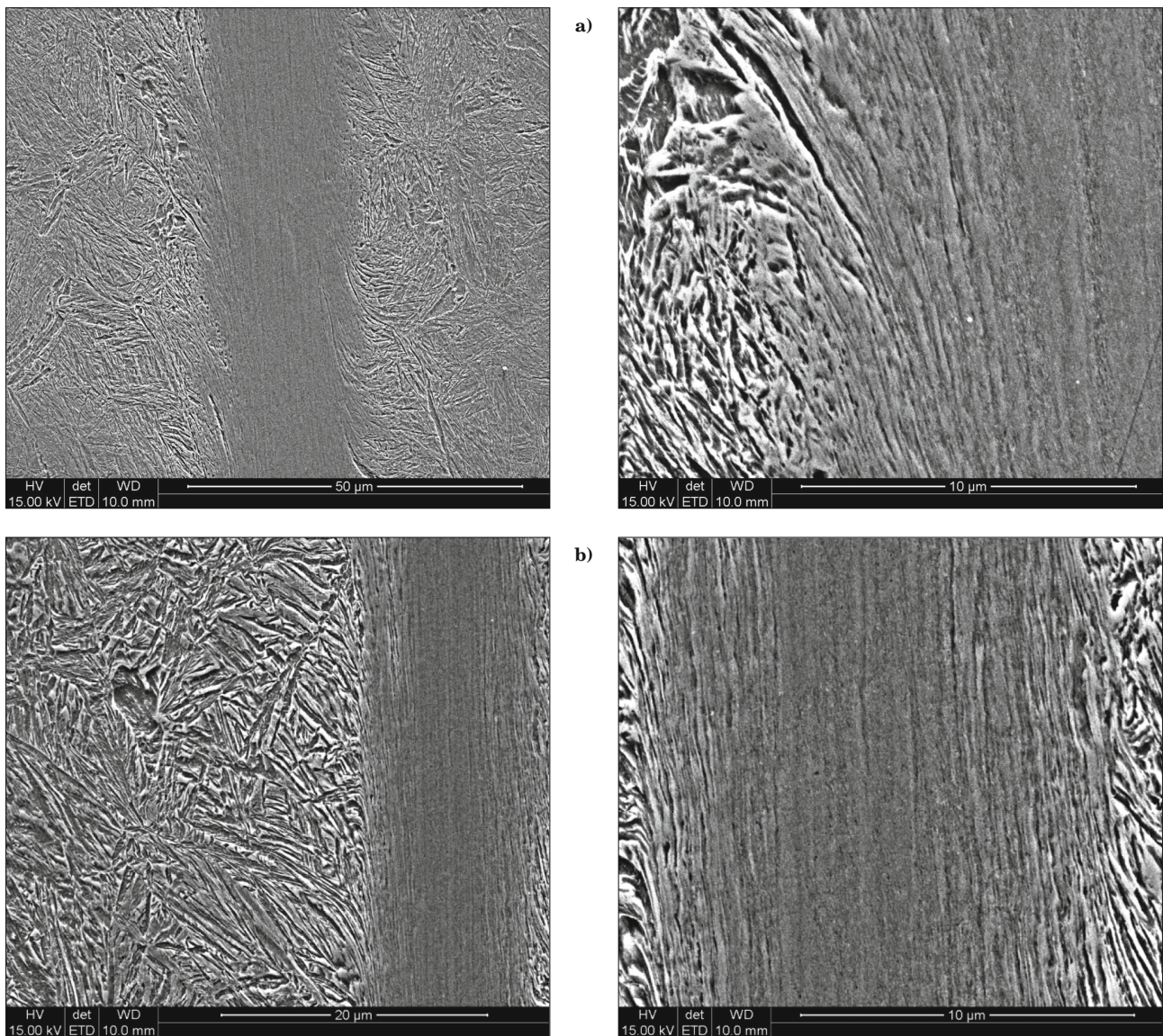
Rys. 1. Mikrostruktura stali nanostrukturalnej po dwuetapowym wygrzewaniu izotermicznym. a) próbka 22; b) próbka 1. Skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 1. Microstructure of nanostructure bainite steel after two stage of isothermal heat treatment. a) specimen 22; b) specimen 1. Scanning electron microscope



Rys. 2. Krzywe ścinania stali nanostrukturanej bainitycznej po dwuetapowej obróbce cieplnej wygrzewania izotermicznego (nr 1-11) oraz komercyjnej stali pancernej klasy 600 (A). Prędkość stempla w zakresie a) 22÷27 mm/s; b) 155÷184 mm/s

Fig. 2. Shear curves of nanostructured bainite steel after two stage of isothermal heat treatment (no 1-11) and commercial armour steel 600 class (A). Punch velocity in the range of a) 22÷27 mm/s; b) 155÷184 mm/s



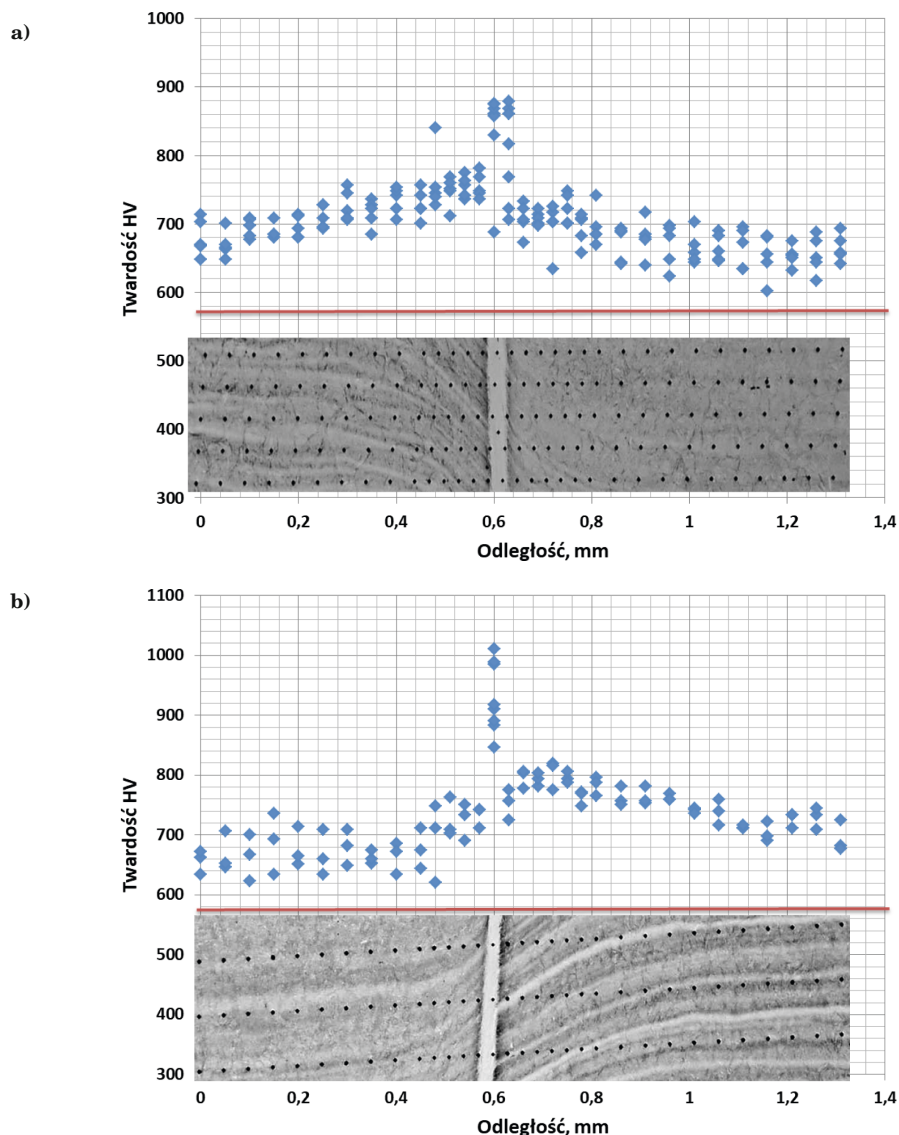
Rys. 3. Mikrostruktura pasma ścinania. a) próbka nr 5; 184 mm/s; b) próbka nr 6, 23 mm/s, skaningowy mikroskop elektronowy

Fig. 3. Microstructure of shear band. a) specimen no 5; 184 mm/s; b) specimen no 6, 23 mm/s, scanning electron microscope

Po testach ścinania wykonano badania mikrostruktury w obszarach lokalizacji naprężeń i odkształceń ścinających (wymuszonych w wyniku zastosowanej geometrii układu próbka-narzędzie). W obszarach tych powstały pasma ścinania o szerokości od 10 do 30 mm (Rys. 3). Obserwacje mikrostruktury pasm ścinania wskazują, że mają one charakter mieszany, wynikający z mechanizmu powstawania: odkształceniowe i powstające z udziałem przemiany fazowej. Pasma charakteryzują się występowaniem dwóch stref, środkowej – w osi pasma – o silnie rozdrobnionej mikrostrukturze (nieidentyfikowalnej przy zastosowanych powiększeniach) oraz odkształconej na granicy pasmo osnowa. Nie stwierdzono istotnych różnic w morfologii pasm występujących w próbkach poddanych odkształceniu z prędkością stempla w zakresie $22 \div 27$ mm/s w zakresie $154 \div 184$ mm/s. W bezpośrednim otoczeniu pasma występowała strefa odkształcona charakteryzująca się wydłużonymi i równoległymi lub silnie nachylonymi w kierunku równoległym do długości pasma pakietami nanolistew bainitu.

W obszarze pasma stwierdzono wzrost twardości osnowy o ok. $100 \div 150$ HV, a maksymalna twardość w osi pasm osiągała wartość ok. 1000 HV (Rys. 4).

W obszarze połączenia blach o grubości 8 mm ze stali nanostrukturalnej w stanie zmiękczonym metodą TIG nie stwierdzono makro- i mikropeknięć. Występowała strefa o maksymalnej twardości 750 HV oraz strefa przejściowa o zmiennej twardości od 750 do 300 HV. Złącze po uzyskaniu pozytywnych wyników badań jakości w zakresie obecności pęknięć i mikropeknięć poddano finalnej obróbce cieplnej stosowanej dla stali nanostrukturalnych w celu otrzymania właściwości użytkowych. Obróbka polegała na austenitowaniu w temperaturze 950°C , regulowanym chłodzeniu i wygrzewaniu izotermicznym w temperaturze 210°C . Nie stwierdzono obecności pęknięć w obszarze złącza w wyniku przeprowadzonej obróbki cieplnej (Rys. 5a). Wyniki badań mikrostruktury obszaru spoiny wykazały obecność nanolistwowego bezwęglkowego bainitu równomiernie rozmieszczonego na grubości złącza. W badaniach za pomocą mikroskopu świetlnego ujawni-



Rys. 4. Rozkład twardości w obszarze pasm ścinania. Próbką 11, a) 23 mm/s; b) 155 mm/s. Czerwona linia wskazuje średnią twardość osnowy materiału przed testem ścinania

Fig. 4. Hardness distribution in the vicinity of shear band. Specimen no 11, a) 23 mm/s; b) 155 mm/s. Red line indicates mean value of hardness of the steel matrix before shear test

niono dwa wzajemnie nałożone typy struktur: dendrytyczną strukturę krzepnięcia charakterystyczną dla spoiny oraz mikrostrukturę finalną w postaci bainitu nanolistwowego (Rys. 5b). Obecność mikrostruktury nanolistwowego bezwęglkowego bainitu potwierdzono w badaniach za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Wyniki pomiarów wykazały twardość obszaru spoiny w zakresie 590–610 HV, przewidywaną po zastosowaniu obróbki cieplnej złącza (Rys. 5a).

Ocenę odporności na ścieranie stali nanostrukturalnej bainitycznej przeprowadzono metodą Pin-on-Disk. Analizie poddano zmiany ubytku masy oraz wartości współczynnika stopnia zużycia (SWR). Współczynnik SWR (Specific Wear Ratio, mm^3/Nm) wyznaczono na podstawie zależności:

$$SWR = V_L / (F_N d)$$

gdzie:

V_L – ubytek objętości badanego materiału [mm^3],
 F_N – obciążenie (siła nacisku) [N],

d – długość drogi badania ścieralności (m).

Ubytek objętości określa zależność:

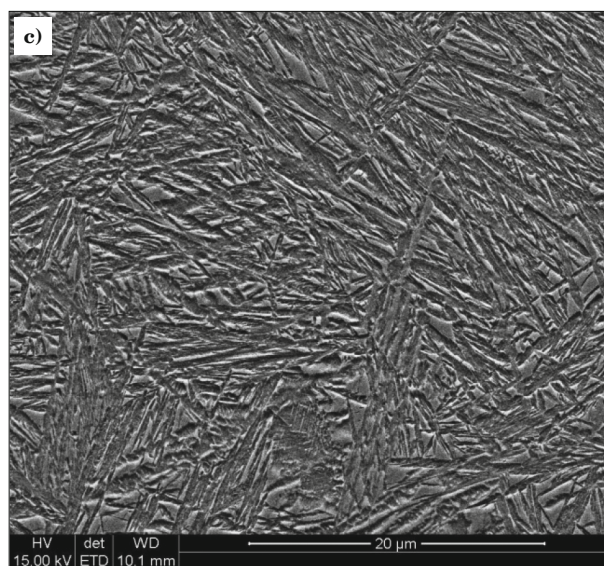
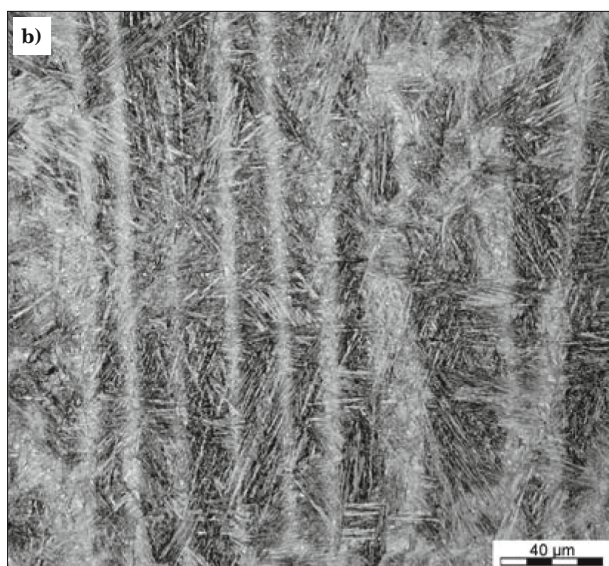
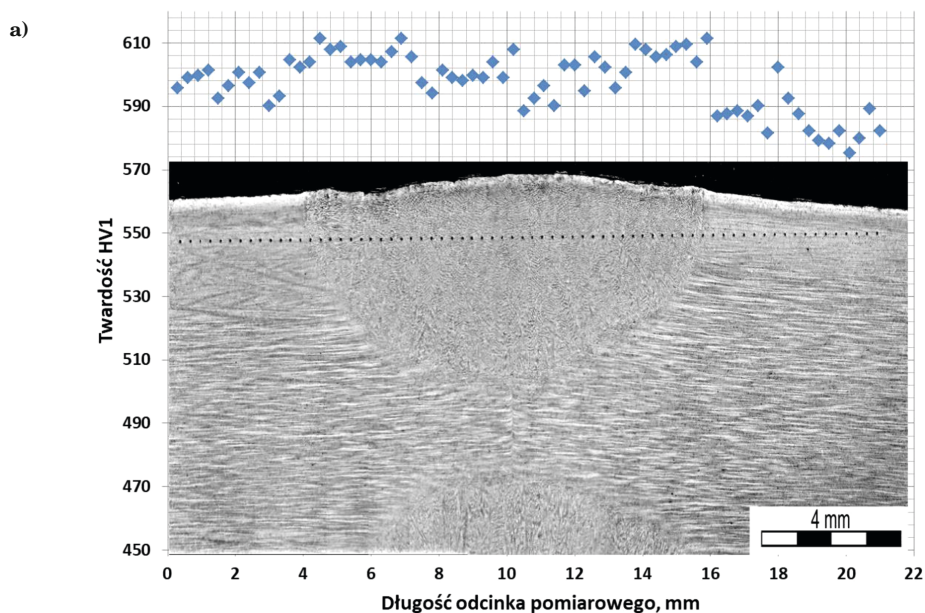
$$V_L = 2\pi R S_p$$

gdzie:

R – promień profilu wytarcia,

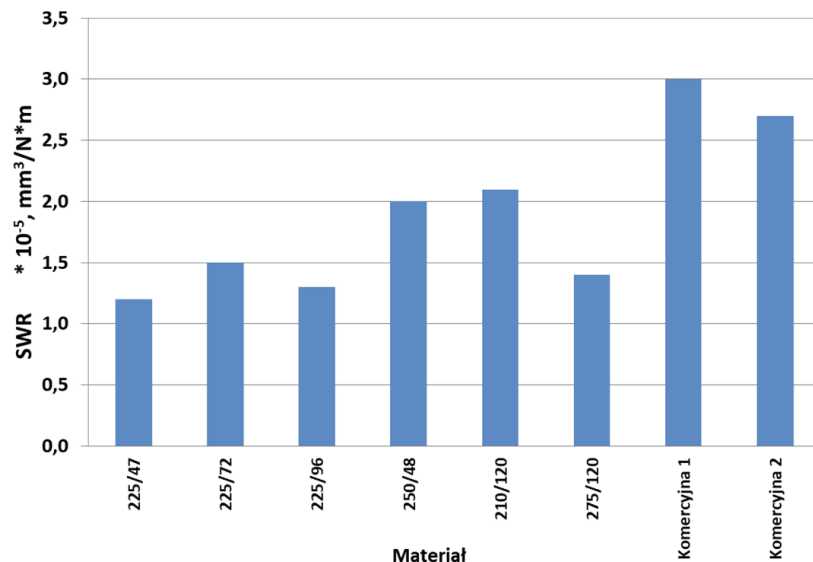
S_p – średnie pole przekroju poprzecznego, wyznaczone jako całka krzywej profilu w zadanych granicach metodą trapezów.

Próbkę ze stali nanostrukturalnej – wariant 225/96 charakteryzuje mniejsza głębokość śladu wytarcia (ok. 30 μm) w porównaniu z komercyjną stalą trudnościeralną nr 2 (ok. 60 μm). Przekłada się to bezpośrednio na ponad dwukrotnie mniejszy ubytek masy stali nanostrukturalnej w odniesieniu do stali komercyjnej. Współczynnik SWR dla stali nanostrukturalnej – wariant 225/96 wynosi $1,2 \cdot 10^{-5}$ a dla stali komercyjnej nr 2 jest ponad dwukrotnie większy (Rys. 6).



Rys. 5. Wyniki pomiarów twardości oraz makrostruktura (a) i mikrostruktura (b, c) złącza spawanego TIG. Blacha o grubości 8 mm spawana w stanie zmiękczonym a następnie złącze obrabiane cieplnie – BA 8z (210/120)

Fig. 5. Hardness measurement results and macrostructure (a) and microstructure (b, c) of TIG welded joint. Sheet of thickness of 8 mm welded in the soft annealing state and next putted to heat treatment – BA 8z (210/120)



Rys. 6. Wyniki obliczeń współczynnika stopnia zużycia (SWR-Specific Wear Ratio)

Fig. 6. Results of calculation of SWR coefficient (Specific Wear Ratio)

4. PODSUMOWANIE

W wyniku zastosowania dwuetapowego wygrzewania izotermicznego uzyskano korzystny zestaw właściwości mechanicznych wyznaczonych w statycznej próbie rozciągania i w próbie ścinania. W wyniku dwuetapowego wygrzewania izotermicznego kolejno w temperaturach 180 i 225°C w czasie sumarycznym 72 godziny, uzyskano $R_{p0,2} = 1250$ MPa, $R_m = 2040$ MPa, $A = 15\%$ oraz wytrzymałość na ścinanie $R_t = 1360$ i 1440 MPa odpowiednio dla prędkości stempla 23 i 155 mm/s. Dla temperatur wygrzewania 210 i 225°C z zastosowaniem sumarycznego czasu wygrzewania 64 godziny uzyskano: $R_{p0,2} = 1280$ MPa, $R_m = 2060$ MPa, $A = 13\%$. Materiał o wyższym poziomie granicy plastyczności powstał w wyniku zastosowania czasu sumarycznego obróbki 120 godzin. Był wygrzewany w temperaturach 210 i 250°C i charakteryzował się następującymi właściwościami mechanicznymi: $R_{p0,2} = 1450$ MPa, $R_m = 2000$ MPa, $A = 13\%$. Ten wariant charakteryzował się ponadto najwyższą wytrzymałością na ścinanie wynoszącą 1500 i 1590 MPa odpowiednio dla prędkości stempla 27 i 184 mm/s oraz plastycznością w próbie ścinania (przemieszczeniem stempla do wystąpienia pęknięcia). Mikrostruktura stali po dwuetapowym wygrzewaniu izotermicznym z zastosowaniem temperatury poniżej M_S składa się z listwowego bainitu bezwęglowego, austenitu resztkowego oraz martenzytu nisko odpuszczonego w postaci równomiernie rozmieszczonych listew.

Na podstawie wyników pomiarów wytrzymałości na ścinanie stwierdzono, że stal nanostrukturalną po dwuetapowym wygrzewaniu izotermicznym charakteryzuje wyższa wytrzymałość oraz przemieszczenie w porównaniu do komercyjnej stali pancerniej klasy 600. W strefie lokalizacji naprężeń powstają pasma ścinania o mieszanym typie mikrostruktury: silnie od-

kształconej i wydłużonej w kierunku długości pasma i środkowej o bardzo drobnym ziarnie. Stale nanostrukturalne bainityczne charakteryzuje występowanie strefy o wysokim stopniu odkształcenia na granicy pasmo-osnowa. W tym obszarze sporadycznie występują mikropęknięcia. W stalach nanostrukturalnych poddanych dwuetapowemu wygrzewaniu izotermicznemu w warunkach ścinania powstają pasma o szerokości w zakresie 10÷30 mm i maksymalnej twardości w osi pasma ok. 1000 HV.

Wstępne testy spawania stali nanostrukturalnych bainitycznych wykazały, że bez względu na stan materiału przed spawaniem (zmiękczonej lub po finalnej obróbce cieplnej wysokiej twardości) twardość w obszarze złącza osiąga poziom do 900 HV i wykazuje ono wówczas niską plastyczność. W spoinie wykonanej metodą TIG dla blach o grubości 8 mm o wysokiej twardości powstały pęknięcia. Ten sam materiał spawany w stanie zmiękczonej, a następnie poddany finalnej obróbce cieplnej, charakteryzował się wysoką jakością w obszarze złącza (brak pęknięć i mikropęknięć) oraz równomierną twardością ok. 600 HV.

Stale nanostrukturalne cechuje wysoka odporność na ścieranie, określona współczynnikiem stopnia zużycia SWR o wartości ok. $1,2 \cdot 10^{-5}$ mm³/Nm. SWR dla komercyjnej stali trudnościeralnej klasy 600 wynosi w tych samych warunkach testu ok. $2,6 \cdot 10^{-5}$ mm³/Nm.

Uzyskane wyniki badań zostaną wykorzystane przy opracowaniu technologii wytwarzania blach ze stali nanostrukturalnej bainitycznej stanowiących elementy opancerzenia pojazdów i obiektów infrastruktury oraz elementy urządzeń i infrastruktury przemysłowej o wymaganej wysokiej odporności na ścieranie.

Artykuł zawiera wyniki badań uzyskane w pracy statutowej Instytutu Metalurgii Żelaza S0-0950/2017 finansowanej z dotacji MNiSW na rok 2017.

LITERATURA

- [1] X.L. Wang, K.M. Wu, F. Hu, L. Yu and X.L. Wan, *Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel*, Scripta Materialia 74 (2014), s. 56-59.
- [2] F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia, K.J.A. Mawella, D.G. Jones, P. Brown, *Very strong low temperature bainite*, Materials Science and Technology, (18) (2002), s. 279-284.
- [3] C. Garcia-Mateo, F.G. Caballero and H.K.D.H. Bhadeshia, *Development of Hard Bainite*, ISIJ International, 43, (8), (2003), s. 1238-1243.
- [4] F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia, *Very strong bainite*, Current Opinion in Solid State and Materials Science, (8) (2004), s. 251-257.
- [5] C. Garcia-Mateo, T. Sourmail, F. G. Caballero, V. Smanio, M. Kuntz, C. Ziegler, A. Leiro, E. Vuorinen, R. Elvira, T. Teeri, *Nanostructured steel industrialisation: plausible reality*, Materials Science and Technology, 30 (9) (2014), s. 1071-1078.
- [6] C. Garcia-Mateo, F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia, *Acceleration of Low-temperature Bainite*, ISIJ International, 43 (11) (2003), s. 1821-1825.
- [7] F. Hu, P.D. Hodgson, K.M. Wu, *Acceleration of the super bainite transformation through a coarse austenite grain size*, Materials Letters, 122, (2014), s. 240-243.
- [8] T. Sourmail, V. Smanio, *Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels*, Acta Materialia, 61 (7) (2013), s. 2639-2648.
- [9] B. Garbarz, B. Niżnik-Harańczyk, *Modification of microstructure to increase impact toughness of nanostructured bainite-austenite steel*, Materials Science and Technology 31 (7) (2015) s. 773-780.
- [10] B. Garbarz, B. Walnik, W. Zalecki, *Obróbka cieplna wysokowytrzymałych stali konstrukcyjnych z wykorzystaniem przemiany izotermicznej poniżej temperatury M_s* , Prace Instytutu Metalurgii Żelaza 69 (2) (2017), s. 2-10.
- [11] B. Garbarz, W. Zalecki, *Kinetyka izotermicznych przemian fazowych poniżej temperatury M_s w ultra wysokowytrzymałych stalach konstrukcyjnych*, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza 69 (1) (2017), s. 2-9.
- [12] J. Marcisz, B. Walnik, R. Rozmus, *Właściwości mechaniczne stali ultrawytrzymałych w warunkach dynamicznych naprężeń ścinających*, Praca badawcza IMŻ nr SO 0924, (2016) nieopublikowana.
- [13] J. Marcisz, W. Burian, B. Walnik, *Opracowanie idei i założeń technicznych projektu lekkiego opancerzenia na bazie perforowanych płyt ze stali o wytrzymałości powyżej 2 GPa, spełniającego wymagania 2 i 3 poziomu ochrony wg STANAG 4569*, Praca badawcza IMŻ nr SO 0929, (2016) nieopublikowana
- [14] W. Burian, J. Marcisz, B. Garbarz, L. Starczewski, *Nanostructured bainite-austenite steel for armours construction*. Archives of Metallurgy and Materials, 59 (3) (2014), s. 1211-1216.
- [15] J. Marcisz, W. Burian, J. Janiszewski, R. Rozmus, *Microstructural changes of the nanostructured bainitic steel induced by quasi-static and dynamic deformation*, Archives of Metallurgy and Materials 62 (4) (2017), s. 2317-2329.
- [16] J. Marcisz, B. Walnik, W. Burian, A. Iwaniak, J. Wiecek, D. Paluch, *Odporność na zużycie erozyjne nanostrukturalnej stali bainityczno-austenitycznej*, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 67 (1) (2015), s. 14-21.
- [17] B. Walnik, J. Marcisz, A. Iwaniak, J. Wiecek, *Badania zużycia ściernego nanostrukturalnej stali bainitycznej*, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 69 (3) (2017), s. 55-60.